

بهینه‌سازی عملکرد سامانه انتقال قدرت دورگه با معرفی یک تقسیم‌کننده توان جدید

بهروز مشهدی*

استادیار دانشکده خودرو دانشگاه علم و صنعت ایران
b_mashhadi@iust.ac.ir

سیدابومحمد عمادی

کارشناس ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران
sm.emadi@ikco.com

* نویسنده مسوول / پذیرش اولیه مقاله: ۸۸/۲/۱۰ پذیرش نهایی: ۸۸/۱۰/۱۵
شماره مقاله: ۸۸۱۰۰

چکیده

در این نوشتار، سامانه انتقال قدرت دورگه‌ای معرفی شده که در آن، یک مجموعه تقسیم‌کننده توان جدید اتصالی مکانیکی را بین چهار محور موتور احتراقی، دو موتور برقی و محور متصل به تفاضلی (دیفرانسیل) و چرخ‌ها فراهم می‌آورد. یک راهبرد^۱ پایشی^۲ مؤثر برای سامانه انتقال قدرت دورگه جدید طراحی و سپس مراحل شبیه‌سازی و نتایج آن ارائه شده است. پایشگر^۳ طراحی شده دارای چهار ورودی توان درخواستی، سرعت خودرو، حد ذخیره انباره و دمای موتور احتراقی است و عملکرد تک تک اجزای انتقال قدرت شامل موتور احتراقی، دو موتور برقی و انباره را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که بازده کل سامانه بیشینه شود. این پایشگر با استفاده از منطق فازی چگونگی ذخیره انباره را با توجه به ورودی‌های دریافتی از تک تک اجزا تعیین می‌کند. این منطق فازی حد ذخیره انباره را همواره در محدوده‌ای بالا نگه می‌دارد و در صورت امکان میزان ذخیره انباره را افزایش می‌دهد تا نقاط عملکردی موتور احتراقی را به نقاط بهینه‌تر نزدیک کند. همچنین پایشگر طراحی شده با استفاده از یک بهینه‌سازی عددی، دور موتور احتراقی را تعیین می‌کند تا نه صرفاً موتور احتراقی بلکه کل سامانه را در حالت بهینه قرار دهد. برای شبیه‌سازی سامانه انتقال قدرت و پایشگر طراحی شده از نرم افزارهای متلب-سیمولینک^۴ و ادوایزر^۵ استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی ارائه شده، با نتایج شبیه‌سازی انجام شده با پایشگر پیش فرض مقایسه شده است که این مقایسه کارآمدی پایشگر طراحی شده را نشان می‌دهد.

قابلیت کوچکتر انتخاب کردن موتور احتراقی بدون قربانی کردن کارآمدی^۶، ترمزگیری برگشت پذیر و فناوری خاموش کردن موتور احتراقی^۷ اشاره کرد. این قابلیت‌ها به همراه استفاده از تمامی فرصت‌ها برای کاهش تلفات از جمله تلفات در اجزای فرعی، چرخ و مقاومت هوا، باعث کاهش مصرف سوخت و آلایندگی خودروهای دورگه می‌شوند. برای یک نوع سامانه انتقال قدرت دورگه انتخاب شده، طراحی سامانه دورگه شامل مسائل متعددی از جمله دو مورد مهم اندازه بندی اجزا^۸ و راهبرد پایشی است. در اندازه

کلیدواژه‌ها: مجموعه تقسیم‌کننده توان، سامانه انتقال قدرت دورگه، راهبرد پایشی، حد ذخیره، منطق فازی

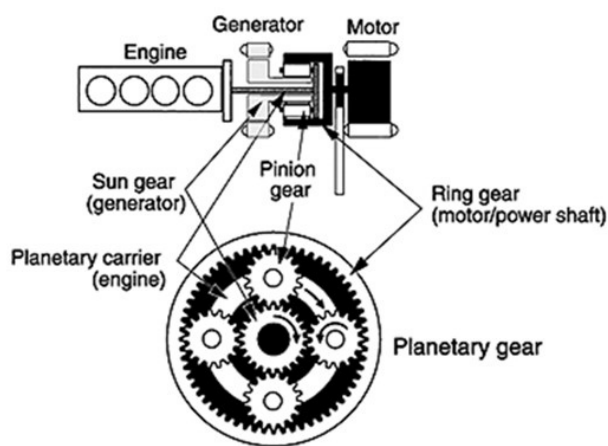
۱- مقدمه

دورگه سازی سامانه انتقال قدرت به معنی اضافه کردن یک منبع انرژی برگشت پذیر (انباره و موتور برقی) در کنار منبع انرژی برگشت ناپذیر اولیه (موتور احتراقی) برای بهبود بازدهی خودرو است. این عمل قابلیت‌هایی را فراهم می‌آورد که از جمله آن‌ها می‌توان به

1- Strategy
2- Control
3- Controller
4- MATLAB-Simulink

5- Advisor
6- Performance
7- Stop-Start (Idle off)
8- Component Sizing

موتور احتراقی و عیب تبدیلات و تلفات بسیار زیاد انرژی هستند. دورگه‌های نوع موازی دارای مزیت تبدیلات کم و در نتیجه تلفات انرژی کم در سامانه انتقال قدرت و عمدتاً دارای عیب وابستگی دور موتور احتراقی به چرخ‌ها هستند. سامانه‌ای که در اینجا معرفی می‌شود، مزایای انواع موازی و ردیفی را دارد، ضمن اینکه عیب عمده آن‌ها را ندارد. مهمترین سامانه مشابه، سامانه دورگه تویوتا است که در آن اتصال چنگکی و جعبه دنده وجود ندارد و مجموعه تقسیم کننده توان^{۱۳} که شامل یک چرخدنده سیاره‌ای است کارکرد محوری را دارد. محور موتور احتراقی به حامل و محور چرخدنده موتور مولد ۱ به خورشیدی متصل است. همچنین چرخدنده موتور مولد ۲ به حلقه متصل است و حلقه نیز مستقیماً از طریق یک مجموعه چرخدنده کاهنده به تقاضای و چرخ‌ها متصل است. (شکل ۱).



شکل ۱ سامانه تقسیم توان در دورگه تویوتا

در این سامانه، توان موتور احتراقی به دو مسیر تقسیم می‌شود. یک بخش به طور مستقیم به چرخ‌ها منتقل می‌شود و بخشی دیگر یک بار در یک موتور مولد تبدیل به توان برقی و دوباره در موتور مولد دیگر تبدیل به توان مکانیکی و به چرخ‌ها منتقل می‌شود. بنابراین این سامانه تلفات انرژی کمتری نسبت به نوع ردیفی (که تمام توان موتور احتراقی به توان برقی تبدیل می‌شود) و تلفات انرژی بیشتری نسبت به نوع موازی دارد. استفاده از چرخدنده سیاره‌ای در این سامانه باعث می‌شود تا اتصال مکانیکی مستقیم بین موتور احتراقی و چرخ‌ها از بین برود و بنابراین مانند یک جعبه دنده پیوسته^{۱۴} می‌توان موتور احتراق داخلی را در نقطه عملکردی بهینه تنظیم کرد. در این سامانه، می‌توان بلافاصله موتور احتراقی را در توان دلخواه تنظیم کرد بنابراین بلافاصله به خواست راننده پاسخ می‌دهد. این موضوع و نداشتن پله تعویض دنده رانندگی لذت بخشی را فراهم می‌آورد. همچنین قرار دادن موتور احتراقی در توان دلخواه بدون توجه به سرعت خودرو باعث افزایش چشمگیر بازدهی دینامیکی نسبت به سامانه انتقال قدرت با اجزای مشابه و دارای جعبه دنده معمولی می‌شود. مجموعه تقسیم توان جدید که در شکل ۲ جزئیات آن دیده می‌شود، جایگزین سامانه سیاره‌ای تویوتا شده است. مجموعه تقسیم کننده توان

بندی اجزا، هدف، بهینه کردن عواملی مانند مصرف سوخت، هزینه و وزن با قید حفظ کارآمدی است و از روش‌های متعدد بهینه‌سازی از جمله بهینه‌سازی عمومی^۱ برای این هدف استفاده می‌شود. مورد دیگر، راهبرد پایشی است که تأثیر برجسته‌ای بر بهبود مصرف سوخت و آلایندگی خودروی دورگه دارد. راهبرد پایشی، مدیریت انرژی را در خودروهای دورگه انجام می‌دهد و تأثیر مهمی بر خودروی دورگه دارد. راهبرد پایشی، قاعده پایشی است که با توجه به ورودی راننده و اطلاعاتی که از تک تک اجزا می‌گیرد، علائم پایشی را به پیشگر تک تک اجزا می‌فرستد و بدین ترتیب تمام اجزا را مدیریت می‌کند.

سامانه انتقال قدرت مورد نظر در این مقاله سامانه نوینی است که برای اولین بار به توسط نگارندگان معرفی شده است. راهبرد پایشی ارائه شده، متناسب با این نوع سامانه توسعه داده شده است به گونه‌ای که از نتایج تحقیقات انواع سامانه‌های دیگر دورگه استفاده شده است.

قواعد متعددی را در طول زمان محققان برای راهبرد پایشی انواع مختلف سامانه‌های دورگه ارائه و توسعه داده‌اند. فارال^۲ و جونز^۳ در سال ۱۹۹۳، پاول^۴ در سال ۱۹۹۸، سپ^۵ در سال ۱۹۹۹ و براهما^۶ در سال ۱۹۹۹ همگی پایش قانون مدار^۷ را بر اساس منطق فازی برای خودروهای دورگه موازی توسعه داده‌اند [۱-۴]. سلمان^۸ در سال ۲۰۰۴ راهبرد پایشی را برای یک دورگه موازی توسعه داده است به گونه‌ای که در آن ورودی راننده، حد ذخیره انباره و دور موتور مولد وارد یک پیشگر فازی می‌شود و این پیشگر چگونگی تقسیم توان بین موتور احتراقی و موتور برقی را تعیین می‌کند [۵]. ولی در روش ارائه شده، صرفاً موتور احتراقی بهینه می‌شود. اسکاتن^۹ نیز روش مشابهی را ارائه داده است که در آن نیز صرفاً موتور احتراقی بهینه می‌شود [۶]. هرمنس^{۱۰} پایش قانون مدار سامانه دورگه تویوتا^{۱۱} را ارائه کرده است [۷]. در روش وی چگونگی تقسیم توان مورد نیاز بین موتور احتراقی و انباره تشریح شده است. در توان‌های درخواستی ضعیف و هنگامی که حد ذخیره انباره به اندازه کافی بزرگ است، سامانه در حالت تنها برقی قرار می‌گیرد و صرفاً انباره توان مورد نیاز را تأمین می‌کند. هنگامی که توان درخواستی افزایش می‌یابد یا حد ذخیره انباره از حد معینی کمتر می‌شود موتور احتراق داخلی برای تأمین توان روشن می‌شود. در صورتی که موتور احتراق داخلی به تنهایی نتواند نیروی رانشی مورد نیاز را تأمین کند، سامانه در حالت برقی کمکی قرار می‌گیرد و انباره بخشی از توان را تأمین می‌کند. توضیح مشابهی را شرکت تویوتا در پایگاه اطلاع‌رسانی خود منتشر کرده است. در دانشگاه میشیگان جینمینگ لیو^{۱۲} و هوپنگ^{۱۳} یک الگوی دینامیکی برای سامانه دورگه تویوتا در نرم افزار سیمولینک توسعه داده و قاعده پایشی قانون مدار موجود را برای الگوی خود استفاده کرده‌اند [۸].

راهبرد پایشی که در این مقاله معرفی می‌شود، بر پایه منطق فازی و بهینه‌سازی عددی طراحی شده است. این پیشگر در هر لحظه نه صرفاً موتور احتراقی بلکه کل سامانه را در حالت بهینه قرار می‌دهد. همچنین در این پیشگر مسایلی همچون عمر انباره، بازدهی ذخیره و خارج کردن موتور احتراقی از نواحی کم بازده در نظر گرفته شده است.

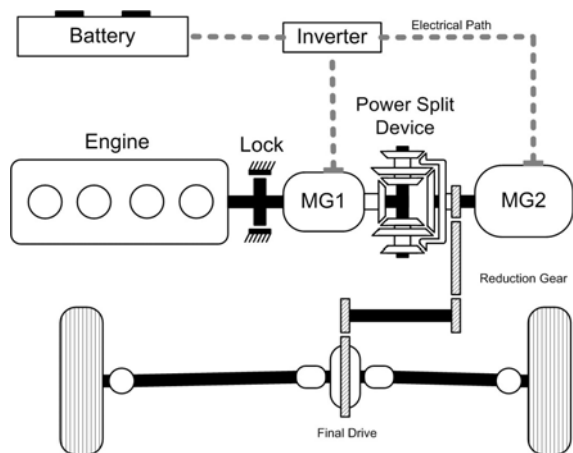
۲- تشریح سامانه انتقال قدرت

دورگه‌های نوع ردیفی دارای مزیت عدم اتصال مکانیکی مستقیم بین چرخ‌ها و

1- Global Optimization
2- Farral
3- Jones
4- Powell
5- Sepe
6- Brahma
7- Rule-Based
8- Salman

9- Schouten
10- Hermance
11- Toyota Hybrid System
12- Jiming Liu
13- Huei Peng
14- Power Split Device
15- Continuously Variable Transmission

دقیق پایش می‌شوند تا هیچ ضربه ناشی از روشن شدن موتور به خودرو وارد نشود. بدین منظور با توجه به روابط گشتاور مجموعه تقسیم توان، گشتاور دو موتور مولد به گونه‌ای پایش می‌شود که در حالی که گشتاور راه اندازی به موتور وارد می‌شود، در عین حال هیچ گشتاوری به محور محرک چرخ‌ها وارد نشود.



شکل ۳ سامانه انتقال قدرت دورگه جدید

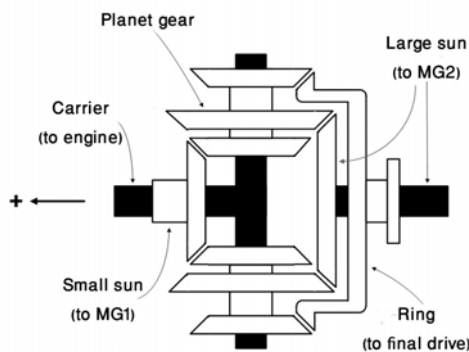
۳- پایش سامانه

پایش یک خودروی دورگه به دو سطح تقسیم می‌شود، پایش کلی^۱ و پایش اجزا^۲ [۱۱]. پایشگر کلی با توجه به ورودی راننده و اطلاعاتی که از تک تک اجزا می‌گیرد، علائم پایشی را به پایشگر تک تک اجزا می‌فرستد. پایشگر هر جزء دستورهای پایش کلی را در یافت و به طور جزئی تر از طریق عملگرها^۳ جزء وابسته به خود را پایش می‌کند. پایشگر کلی، مدیریت انرژی را در خودروهای دورگه انجام می‌دهد و قاعده پایشی آن تحت عنوان راهبرد پایشی شناخته می‌شود.

همانطور که در شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد، راهبرد پایشی تعیین می‌کند که موتور احتراق داخلی روشن باشد یا خاموش و اگر روشن باشد موقعیت دریچه گاز چگونه باشد، دور موتورهای برقی چه باشد، اگر سامانه در حالت ترمزگیری باشد ترمزگیری برگشت پذیر چگونه باشد و ترمزهای اصطکاکی جلو و عقب با چه نیرویی ترمز کنند.

در این سامانه، به واسطه اتصال مکانیکی که بین دو موتور مولد و موتور احتراقی وجود دارد، با تنظیم دور یکی از دو موتور مولد می‌توان دور موتور احتراقی را تعیین کرد و پایشگر اصلی با فرستادن سیگنال دور مناسب به یکی از این دو موتور مولد، موتور احتراقی را در دور دلخواه تنظیم می‌کند. در این مطالعه از شبیه‌سازی رو به عقب^۴ استفاده شده است، آنچه که راهبرد پایشی در شبیه‌سازی تعیین می‌کند، دور و گشتاور موتور احتراقی است که از این دو عامل وضعیت عملکردی اجزای دیگر از جمله دو موتور برقی و انباره مشخص می‌شوند. اجزای سامانه انتقال قدرت را که برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند، می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

پیشنهاد شده سازوکار با دو درجه آزادی است که یک اتصال مکانیکی بین محورهای خروجی از موتور احتراقی، موتور مولد ۱، موتور مولد ۲ و محوری که به چرخ‌ها متصل است فراهم می‌آورد. اما برای امکان به کارگیری آن تغییراتی از جمله اضافه کردن یک ترمز به محور موتور احتراقی در چیدمان سامانه نیاز خواهد بود. از ترمز به آن جهت بهره گرفته شده است تا از گردش محور موتور احتراقی و تلفات ناشی از آن هنگامی که خاموش است جلوگیری شود.



شکل ۴ مجموعه تقسیم کننده توان جدید

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که سامانه پیشنهادی تشکیل شده است از یک موتور احتراقی، یک قفل روی محور خروجی از موتور احتراقی، موتور مولد برقی ۱، موتور مولد برقی ۲، انباره، وارونگر، مجموعه تقسیم کننده توان، مجموعه چرخنده‌های کاهنده سرعت، تفاضلی و چرخ‌ها تشکیل شده است.

سامانه تقسیم توان جدید باعث ایجاد مزایایی در خودرو دورگه می‌گردد. از آن جمله توان گردش یعنی بخشی از توان موتور احتراقی که پس از دو بار تبدیل (مکانیکی به برقی و مجدداً به مکانیکی) صرف حرکت خودرو می‌شود در سامانه جدید کاهش می‌یابد و بدین ترتیب بازده افزایش می‌یابد.

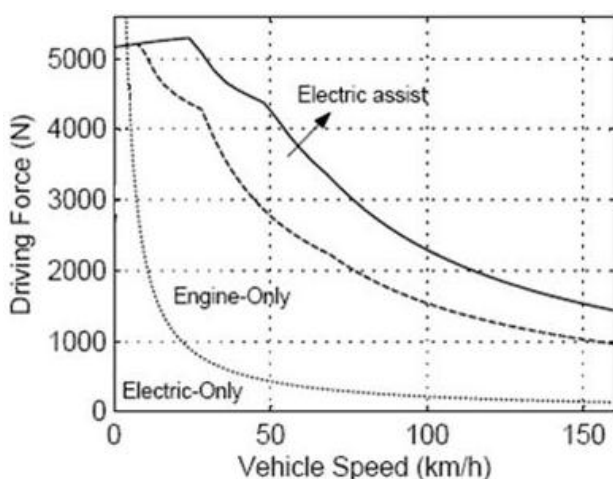
در سامانه تویوتا دریافت بخش چشمگیری از توان موتور احتراقی در بعضی شرایط رانندگی به توسط موتور برقی و همچنین دریافت همزمان انرژی از موتور احتراقی و انباره در حالت برقی کمکی باعث می‌شود تا مجبور به استفاده از موتور برقی بزرگی باشند تا افتی در بازدهی دینامیکی به وجود نیاید. در سامانه جدید با کاهش توان گردش این مشکل حل می‌شود و نیاز به موتور برقی بزرگ از بین می‌رود یا به عبارت دیگر با موتور برقی موجود، بازدهی دینامیکی بهبود می‌یابد.

این سامانه جدید حالات عملکردی متعددی دارد که بسته به شرایط مختلف رانندگی انتخاب می‌شوند. اطلاعات کامل در مورد این سامانه از قبیل حالت‌های عملکردی، معادلات دینامیکی مجموعه تقسیم کننده توان و برتری‌های آن نسبت به سامانه‌های مشابه در مرجع [۹] آمده است.

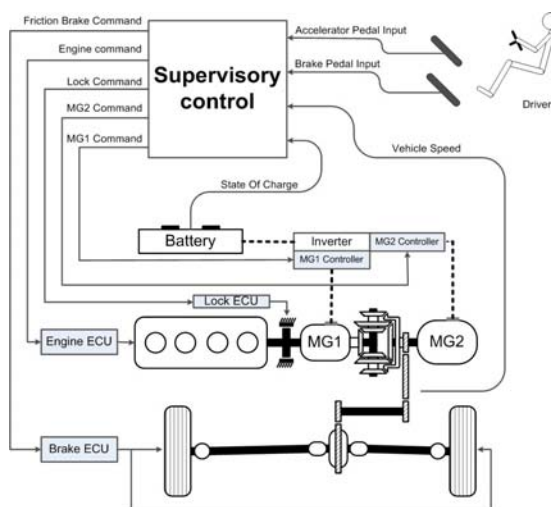
موتور مولد ۱ کارکرد شروع گر قوی موتور احتراقی را نیز دارد. در هنگام روشن شدن موتور احتراقی، موتور مولد ۱ و ۲ با هم به طور دقیق پایش می‌شوند تا هیچ ضربه‌ای به خودرو وارد نشود. در اصل به واسطه وجود اتصال مکانیکی بین موتور احتراقی، دو موتور مولد و محور محرک چرخ‌ها اگر قرار باشد صرفاً موتور مولد ۱ موتور احتراقی را روشن کند، گشتاور ناخواسته‌ای به محور محرک چرخ‌ها وارد می‌شود که باعث ایجاد یک شوک یا تحریک ناخواسته می‌شود. برای رفع این مشکل دو موتور مولد با هم به طور

1- Supervisory Control or Hybrid Control
2- Component Control

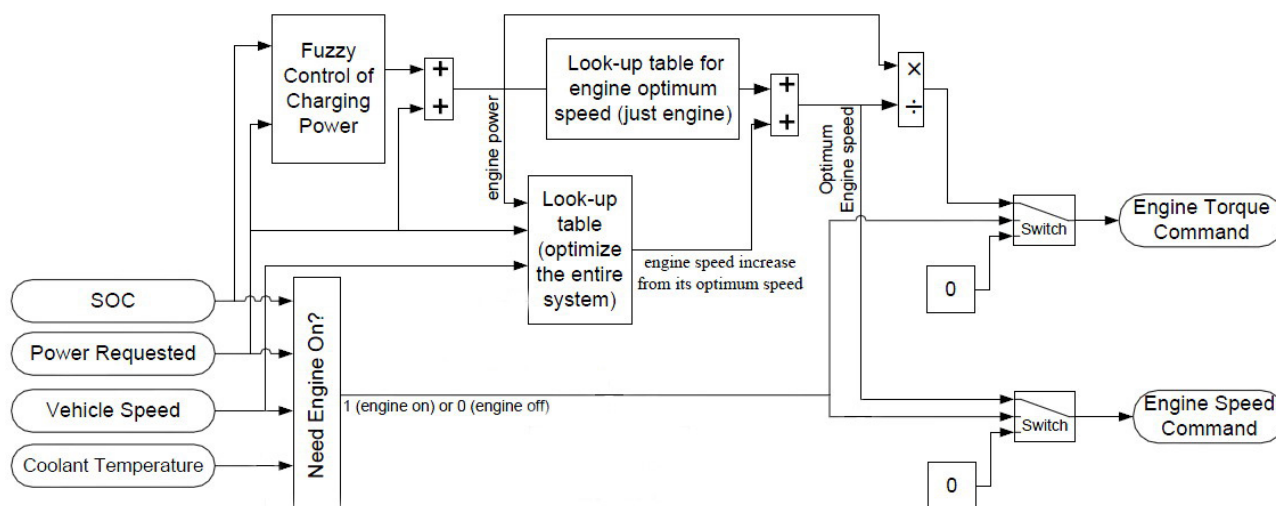
3- Actuator
4- Backward Facing Simulation



شکل ۵ تقسیم توان برای سامانه دورگه



شکل ۴ عملکرد و پایش سامانه دورگه جدید



شکل ۶ ساختار پایشگر

۵- ساختار پایشگر

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، پایشگر اصلی دارای چهار ورودی است که عبارتند از: توان درخواستی، سرعت خودرو، حد ذخیره انباره و دمای موتور احتراقی. این ورودی‌ها ابتدا وارد قسمت نیاز روشن شدن می‌شوند و روشن یا خاموش بودن موتور احتراقی مشخص می‌گردد. در صورتی که لازم باشد تا موتور احتراقی روشن بماند، ابتدا حد ذخیره انباره و توان درخواستی وارد پایشگر فازی از نوع ساگنو^۱ می‌شوند. پایش فازی تصمیم می‌گیرد که با توجه به حد ذخیره انباره و توان درخواستی، توان ذخیره انباره چقدر باشد. توانی که موتور احتراقی باید در آن عمل کند برابر مجموع توان درخواستی و توان ذخیره انباره خواهد بود. این توان وارد قسمت سرعت بهینه موتور می‌شود و در آن دوری که موتور احتراقی داخلی در آن توان دارای بازده بیشینه است پیدا می‌شود.

این قسمت یک جدول داده‌ها می‌باشد که در آن لختی دورانی موتور احتراقی نیز در نظر گرفته شده است. این دور اگرچه موتور احتراقی را در حالت بازده بیشینه قرار می‌دهد، اما تضمین نمی‌کند بازده کل سامانه را خصوصاً در بعضی شرایط خاص بیشینه

۴- تامین توان درخواستی به توسط انباره و مخزن سوخت

در شکل ۵ می‌توان چگونگی تامین توان درخواستی به توسط منابع قدرت (انباره یا مخزن سوخت) را به صورت کلی مشاهده کرد. توان درخواستی می‌تواند به توسط انباره یا موتور احتراقی و یا هر دو تامین شود. در توان‌های درخواستی خیلی ضعیف که موتور احتراقی خیلی کم بازده است، سامانه در حالت تنها برقی قرار می‌گیرد و صرفاً انباره توان مورد نیاز را تامین می‌کند. در توان‌های بزرگتر تا جای ممکن موتور احتراقی بکنهایی توان مورد نیاز را تامین می‌کند. همچنین ممکن است انباره را نیز ذخیره کند. هنگامی که موتور احتراقی نتواند بکنهایی توان مورد نیاز را تامین کند، سامانه در حالت برقی کمکی قرار می‌گیرد و انباره و موتور احتراقی باهم توان مورد نیاز را تامین می‌کنند. در شکل ۵، سه نمودار رسم شده، منحنی‌های نیروی رانشی بیشینه در حالت‌های تنها-برقی، تنها-موتور احتراقی و منحنی نیروی رانشی بیشینه در حالت کلی (برقی کمکی) هستند. در ادامه به پایش دقیقتر سامانه می‌پردازیم.

1- Takagi- Sageno

۷- پایش فازی ذخیرهٔ انباره

انباره به عنوان ذخیره کننده انرژی و بازپس دهندهٔ توان در مواقع نیاز کارکرد اساسی را در خودروی دورگه دارد. نگه داشتن حد ذخیرهٔ انباره در یک محدودهٔ معین بالا، یک امر مطلوب و مهم است^۲. زیرا اولاً بازدهی دینامیکی خودرو به واسطه بالا بودن حد ذخیره انباره تضمین می‌شود زیرا قابلیت ارایهٔ توان انباره با کم شدن حد ذخیره انباره افت خواهد کرد. ثانیاً انباره در این محدوده بازده بالاتری دارد و تلفات برقی کمتری را سبب می‌گردد. سوم این موضوع باعث افزایش عمر انباره می‌شود. یک حد ذخیرهٔ هدف ۰/۶۵، می‌تواند یک حد ذخیره مناسب باشد. در این جا پیشگیری طراحی شده است که حد ذخیرهٔ انباره و توان در خواستی را دریافت کرده و توان ذخیرهٔ مناسب انباره را محاسبه می‌کند. منطقی که برای ذخیرهٔ انباره استفاده شده است به این صورت است:

الف: اگر حد ذخیرهٔ انباره خیلی کم بود (کمتر از ۰/۵)، با حداکثر توان ممکن و با توجه به ظرفیت انباره برای جذب انرژی انباره ذخیره شود. این موضوع برای حفظ بازدهی دینامیکی خودرو و جلوگیری از خرابی انباره ضروری است [۵].

ب: اگر حد ذخیرهٔ انباره خیلی زیاد بود (بیش از ۰/۸) انباره ذخیره نشود. این موضوع نیز برای جلوگیری از خرابی انباره ضروری است [۵].

ج: اگر حد ذخیرهٔ انباره کم بود (بین ۰/۵ و ۰/۶۵) انباره با نرخ متناسب با اختلاف حد ذخیرهٔ فعلی و حد ذخیرهٔ هدف ذخیره شود. این موضوع باعث می‌شود تا در اکثر شرایط معمول رانندگی حد ذخیرهٔ انباره در نزدیکی حد ذخیرهٔ هدف باقی بماند و نرخ کم انرژی در ذخیرهٔ انباره نیز باعث می‌شود تا تلفات کمتری وجود داشته باشد. حد ذخیرهٔ هدف برابر ۰/۶۵ و ضریب برابر ۲۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است، یعنی

$$25000 \times (SOC - 0.65) = P_{ch} \quad (1)$$

برای مثال اگر حد ذخیرهٔ انباره ۰/۵۵ بود انباره باید با توان ۲/۵ کیلووات ذخیره شود.

د: اگر توان در خواستی خیلی کم بود (کمتر از ۶ کیلووات) و حد ذخیرهٔ انباره کم یا معمولی بود، موتور احتراقی در توان ۸ کیلووات عمل کند. به عبارت دیگر

$$P_{req} = 8 \quad (2)$$

توان ۸ کیلووات به کمترین توان موتور در حالت درجهٔ کاملاً باز انتخاب شده است. بدین ترتیب بخشی از توان موتور احتراقی صرف حرکت می‌شود و بخشی دیگر صرف ذخیرهٔ انباره می‌شود.

منطق بیان شده به توسط یک پیشگر فازی از نوع تاکاجی - ساگنه در نرم افزار متلب اجرا شده است. برای آشنایی با این منطق می‌توان به مرجع [۱۳] مراجعه کرد.

قواعد وابسته به این پیشگر را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد. توان‌های نشان داده شده در جدول بر حسب کیلووات هستند. توابع عضویت راهبرد فازی نیز در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. همچنین رویه استنتاجی شکل ۱۰ توان ذخیرهٔ انباره را برای هر حد ذخیره و توان در خواستی نشان می‌دهد.

جدول ۱ قوانین فازی برای پایش ذخیرهٔ انباره

خیلی زیاد	معمولی	ضعیف	خیلی ضعیف	توان مورد نیاز/حد ذخیره باتری
۰	$-P_{req}$	$-P_{req}$	۱۴	کم
۰	۰	$(SOC - 0.65) \times 25$	۱۴	معمولی
۰	۰	۰	۰	زیاد

1- Look up table

2- State of charge (SOC)

کند (باید توجه داشت دو موتور برقی در سامانه وجود دارند که تلفات قابل توجهی را در شرایط مختلف ایجاد می‌کنند).

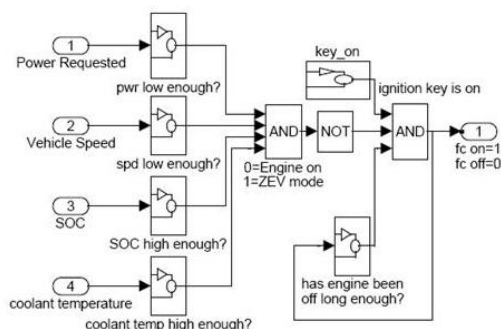
بنابراین باید تشخیص داده شود که برای شرایط خاص چقدر باید از دور بهینه موتور احتراقی انحراف داشت تا بازده کل سامانه بیشینه شود. این کار توسط یک جدول داده‌های^۱ سه بعدی که از طریق بهینه سازی عددی به دست آمده است انجام می‌شود. این بدنه توانی را که موتور احتراقی باید در آن عمل کند، توان درخواستی و سرعت خودرو را دریافت می‌کند و تصمیم می‌گیرد که چقدر باید به دور بهینهٔ موتور احتراقی اضافه شود تا کل سامانه بهینه گردد. در ادامه بدنه‌های اشاره شده بررسی شدند.

۶- پایش خاموش-روشن شدن موتور احتراقی

یکی از مزایای خودروهای دورگه، امکان خاموش کردن موتور احتراقی در مواقعی که کم بازده است، می‌باشد. چهار شرط باید ارضا شود تا موتور احتراقی خاموش شود و اگر هرکدام از این چهار شرط ارضا نشود موتور احتراقی نباید خاموش شود. شرط اول این است که توان در خواستی باید به اندازه کافی کم باشد. موتورهای احتراقی در توان‌های کم بسیار کم بازده هستند. بنابراین بهتر است در توان‌های درخواستی ضعیف موتور احتراقی خاموش شود و سامانه در حالت تنها برقی قرار گیرد. در شبیه‌سازی، توان ۶ کیلووات به عنوان حدی خاموش شدن موتور احتراقی در نظر گرفته شده است در حالت توان درخواستی کمتر از ۶ کیلووات و ارضای بقیهٔ شرایط، موتور احتراقی خاموش خواهد شد.

ضعیف بودن توان موتور احتراقی به تنهایی برای خاموش کردن آن کافی نیست و سه شرط دیگر نیز باید ارضا شود [۱۲]. شرط دوم این است که حد ذخیرهٔ انباره^۲ بیش از ۰/۵ باشد، در صورتی که حد ذخیرهٔ انباره کمتر از ۰/۵ باشد موتور احتراقی باید روشن بماند تا انباره را ذخیره کند. شرط سوم این است که سرعت خودرو از سرعت حدی باید کمتر باشد (۹۰ km/h). در سرعت‌های تندتر از این سرعت، موتور احتراقی نباید خاموش شود، زیرا دور موتور مولد ۲ از دور مجاز آن بیشتر می‌شود. شرط چهارم این است که دمای موتور احتراقی (دمای مایع خنک کننده) باید بیش از ۷۵ °C باشد. موتور احتراقی در دماهای گرم‌تر بازده بزرگ‌تر و آلاینده‌گی کمتری دارد، بهتر است هنگامی که دمای آن کم است روشن بماند تا به دمای مطلوب برسد [۱۲].

برای جلوگیری از روشن و خاموش شدن خیلی سریع موتور احتراقی یک شرط جانبی دیگر نیز باید در نظر گرفته شود. بطوری که حداقل سه ثانیه از خاموش شدن یا روشن شدن موتور احتراقی باید گذشته باشد تا موتور احتراقی بتواند تغییر وضعیت بدهد. این شرط در قسمت مدت زمان خاموشی که در شکل ۷ نشان داده شده است، اجرا می‌شود.



شکل ۷ بلوک دیاگرام خاموش و روشن شدن موتور احتراقی

3- Charge sustaining strategy

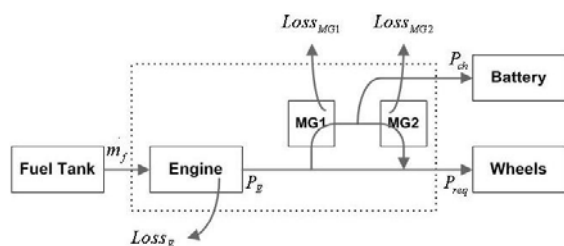
سازی عملکرد کلی سامانه پیاده سازی شده است که جزئیات آن در ادامه آمده است. باید توجه داشت دو موتور برقی در سامانه وجود دارند که تلفات چشمگیری را در شرایط مختلف ایجاد می‌کنند.

فرض کنیم سرعت خودرو، توان درخواستی و توانی که موتور احتراقی باید در آن عمل کند معلوم است. هنگامی که موتور احتراقی در توان PE عمل می‌کند، بخشی از توان آن در دو موتور-مولد تلف و بقیه صرف ذخیره انباره و حرکت خودرو می‌شود که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

برای ارائه معیاری از بازده کل سامانه، ابتدا مصرف ویژه سوخت معادل سامانه تعریف می‌شود که مشابه تعریف موجود برای یک دورگه موازی دارای جعبه دنده پیوسته در مرجع [۱۵] است:

$$SFC_{eq} = \frac{\dot{m}_f}{P_{req} + P_{ch}} = \frac{\dot{m}_f}{P_E - LOSS_{MG1} - LOSS_{MG2}} \quad (3)$$

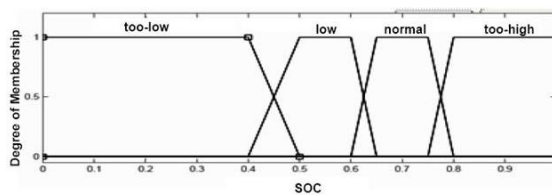
که در معادله (۳) نرخ جرمی مصرف سوخت، SFC_E مصرف سوخت ویژه موتور احتراقی، P_{req} توان دریافتی چرخ‌ها و P_{ch} توان ذخیره انباره است. حال باید تشخیص داده شود که برای شرایط خاص چقدر باید از دور بهینه موتور احتراقی انحراف داشت تا بازده کل سامانه بیشینه گردد، یعنی مصرف ویژه سوخت معادل سامانه کمینه شود. این کار به توسط یک جدول داده‌های سه بعدی که از طریق بهینه‌سازی عددی به دست آمده است، انجام می‌شود.



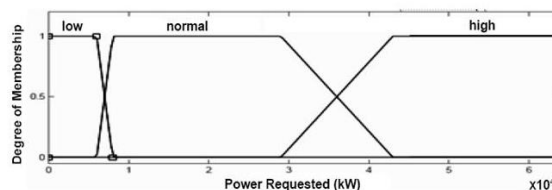
شکل ۱۱ تلفات در سامانه

این جدول داده‌ها با نوشتن یک سری برنامه‌ها در نرم افزار متلب با توجه به منحنی‌های بازده موتور احتراقی و دو موتور برقی به دست آمده است. منحنی‌های بازده دو موتور مولد را می‌توان در شکل‌های ۱ پ و ۲ مشاهده کرد. این جدول داده‌ها، سه ورودی توان درخواستی، توان ذخیره انباره و توان موتور احتراقی را دریافت کرده و دوری از موتور احتراقی که در آن مصرف ویژه سوخت معادل سامانه کمینه است در خروجی می‌دهد. چون جدول داده‌های به دست آمده دارای سه ورودی است، امکان نشان دادن یک رویه که بتواند به ازای همه ورودی‌ها خروجی را نشان بدهد وجود ندارد. برای حالت تنها-موتوراحتراقی ($P_{ch}=0$) رویه مورد نظر رسم شده است که در شکل ۱۲ مشاهده می‌کنید.

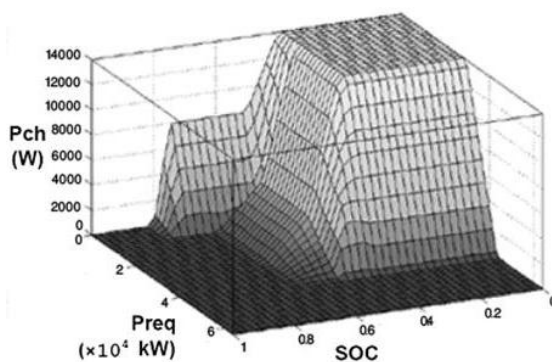
این رویه میزان انحراف از دور بهینه موتور احتراقی را برای بهینه کردن کل سامانه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در ناحیه وسیعی از صفحه سرعت-توان درخواستی مقدار خروجی صفر است، یعنی دور بهینه موتور احتراقی، دور بهینه کل سامانه نیز می‌باشد. اما ملاحظه می‌شود که در سرعت‌های تند و توان‌های درخواستی ضعیف باید به دور بهینه موتور احتراقی اضافه شود تا کل سامانه در حالت بهینه قرار گیرد. دلیل این امر این است که در این حالات، توان چرخ‌های به شدت افزایش می‌یابد و تلفات برقی زیادی ایجاد می‌شود.



شکل ۸ توابع عضویت برای حد ذخیره انباره



شکل ۹ توابع عضویت برای توان درخواستی



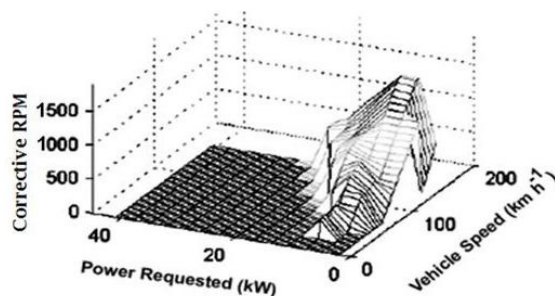
شکل ۱۰ توابع ذخیره انباره برای حد ذخیره‌ها و توان‌های درخواستی مختلف

۸- پایش دور موتور احتراقی

با توجه به معلوم شدن وضعیت روشن یا خاموش بودن موتور احتراقی و توان عملکرد آن (مجموع توان درخواستی و توان ذخیره انباره) حال باید این سوال را که در توان مورد نظر کدام دور مناسب با عملکرد موتور احتراقی است پاسخ داده، از آنجایی که موتور احتراقی منبع توان غالب در سامانه است، شاید منطقی به نظر آید که برای نزدیک شدن به نقطه عملکردی بهینه کل سامانه، می‌توان موتور احتراقی را در دوری که در توان مورد نظر دارای بازده بیشینه است، تنظیم کرد. اما این دور اگرچه موتور احتراقی را در حالت بازده بیشینه قرار می‌دهد، تضمین نمی‌کند بازده کل سامانه را بیشینه کند. این موضوع در سامانه دورگه پریوس تویوتا نیز مورد توجه قرار گرفته [۱۳] ولی چگونگی بهینه سازی عملکرد کل سامانه مشخص نشده، و تأکید زیادی بر روی آن صورت گرفته است. در مقاله حاضر با بهره‌گیری از یک مفهوم بازده کل در خودروی دورگه که در آن مصرف کلی سوخت خودرو با لحاظ نمودن اثر متقابل موتورهای الکتریکی در نظر گرفته می‌شود، قاعده‌ای برای بهینه

جدول ۲ نتایج شبیه سازی

آزمون شهر	مصرف سوخت برحسب لیتر به ازای ۱۰۰ km
شهر	۵/۴
پایشگر پیش فرض	۳/۹
ترکیبی	۴/۷
شهر	۵/۲
پایشگر جدید	۳/۸
ترکیبی	۴/۵



شکل ۱۲ دور اضافه شده به دور بهینه موتور احتراقی در حالت تنها-موتور احتراقی

۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله یک سامانه تقسیم توان جدید جهت جایگزینی سامانه سیاره‌ای تویوتا معرفی گردیده است که باعث ایجاد مزایای بسیار از جمله کاهش چشمگیر توان موتورهای الکتریکی مورد نیاز می‌شود و علاوه کاهش توان برقی گردشی موجود در سامانه و کاهش مصرف سوخت نسبت به سامانه تویوتا از مزایای دیگر طرح است. میزان این بهبود با توجه به نتایج شبیه‌سازی به صورت کمی، حدود هفت تا ده درصد در چرخه ترکیبی است.

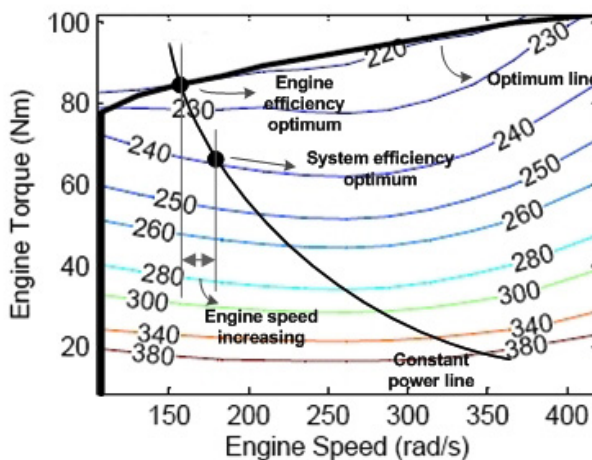
ضمناً یک راهبرد پایش بر پایه منطق فازی و بهینه سازی عددی توسعه داده شده است. این راهبرد پایشی توان درخواستی، سرعت خودرو، حد ذخیره انباره و دمای موتور احتراقی را دریافت و سپس چگونگی ذخیره انباره و وضعیت موتور احتراقی را تعیین می‌کند. این پایشگر موتور احتراقی را در توان‌های درخواستی ضعیف در صورتی که حد ذخیره انباره و دمای موتور احتراقی به اندازه کافی بزرگ و سرعت خودرو از سرعت حدی کندتر باشد، خاموش می‌کند. از منطق فازی برای پایش ذخیره انباره استفاده شده است که این منطق با هدف نگه داشتن همیشگی ذخیره انباره در یک محدوده بالا و خارج کردن موتور احتراقی از نواحی کم بازده طراحی شده است. از یک بهینه سازی عددی برای پایش دور موتور احتراقی استفاده شده است به گونه ای که نه موتور احتراقی بلکه کل سامانه را در حالت بهینه قرار می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی در دو چرخه رانندگی شهری و بیرون شهری ارائه شده و با نتایج شبیه‌سازی با اعمال پایش پیش فرض ادوایزر مقایسه شده است که این مقایسه کارآمدی پایشگر طراحی شده را با کاهش مصرف سوخت نشان می‌دهد.

افزایش دور موتور احتراقی در این حالت‌ها اگرچه موتور احتراقی را از حالت بهینه خارج می‌کند ولی توان چرخهای و تلفات برقی را کاهش می‌دهد. همچنین با بررسی بعضی نقاط مشاهده می‌شود که دور موتور احتراقی در آن‌ها اندکی باید اضافه شود تا یکی از دو موتور-مولد از حالت خیلی کم بازده خارج شود. شکل ۱۳ این مفهوم را نشان می‌دهد.

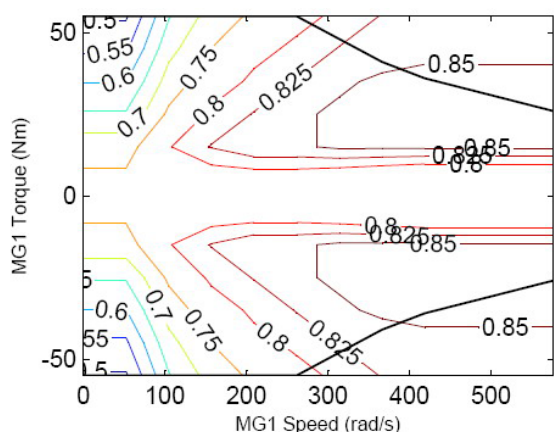
۹- شبیه‌سازی و نتایج

برای شبیه‌سازی سامانه انتقال قدرت و پایشگر طراحی شده از نرم افزار ادوایزر استفاده شده است. الگوی سامانه انتقال قدرت متعلق به نسل اول خودروی پریوس که در بازار ژاپن ارائه گردید، در کتابخانه این نرم افزار موجود است و برای شبیه‌سازی سامانه جدید تغییراتی در الگوی سیمولینک این خودرو و همچنین برنامه‌هایی که برای بعضی اجزا نوشته شده است، داده شده است. ویژگی‌های اجزای انتقال قدرت را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

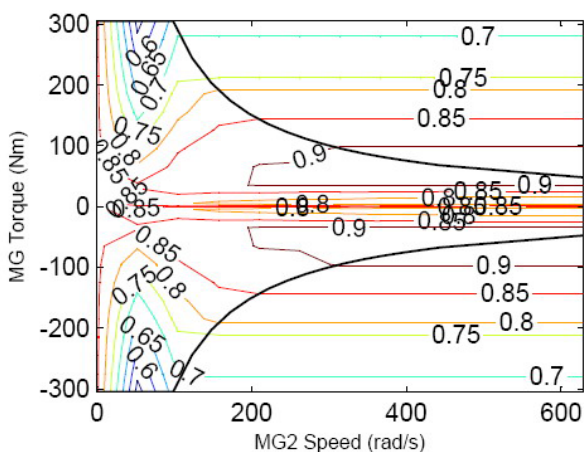
نتایج شبیه‌سازی با اعمال پایشگر طراحی شده برای سامانه جدید و همچنین پایشگر پیش فرض نرم افزار برای سامانه تویوتا در چرخه‌های رانندگی شهری، بیرون شهری و چرخه ترکیبی در جدول ۲ ارائه شده است. بهبودهای حاصله از سامانه جدید انتقال توان و راهبرد پایشی آن مشاهده می‌شود. پایشگر پیش فرض ادوایزر صرفاً بر اساس بهینه کردن موتور احتراقی طراحی و در آن از یک قاعده بسیار ساده برای ذخیره انباره استفاده شده است. بهبود مصرف سوخت در چرخه‌های مزبور دست کم ۲/۵ درصد و تا بیش از ۴ درصد است که ارقام مناسبی در این زمینه هستند.



شکل ۱۳ انحراف از دور بهینه موتور احتراقی برای بهینه کردن کل سامانه



شکل ۱ پ منحنی‌های بازده موتور مولد ۱



شکل ۲ پ منحنی‌های بازده موتور مولد ۲

نمادها

- CVT سامانه انتقال قدرت پیوسته
- F.C مصرف سوخت
- lossMG1 توان اتلافی موتور مولد ۱
- LossMG2 توان اتلافی موتور مولد ۲
- MG1 موتور مولد ۱
- MG2 موتور مولد ۲
- \dot{m}_f نرخ جرمی جریان سوخت
- PE توان عملکردی موتور احتراقی
- Preq توان مورد نیاز برای حرکت خودرو
- Pch توان پرکردن انباره (ورودی به انباره)
- SFCE مصرف ویژه سوخت موتور احتراقی
- SFCeq مصرف ویژه سوخت معادل
- SOC حد پرکردن انباره
- Tempcool دمای سیال خنک کننده موتور احتراقی
- V سرعت خودرو

۱۱- پیوست

جدول ۱ پ اجزای سامانه انتقال قدرت جهت شبیه سازی

مورد	نوع	موتور ۱/۵ لیتری - نسبت انبساط بزرگ - ۴ استوانه خطی DOHC
موتور احتراقی	بیشینه توان بر حسب دور بر دقیقه / کیلووات بیشینه گشتاور بر حسب دور بر دقیقه / نیوتن متر	۴۳/۴۰۰ ۱۰۲/۴۰۰
مولد برق ۲	نوع بیشینه توان بر حسب دور بر دقیقه / کیلووات بیشینه گشتاور بر حسب دور بر دقیقه / نیوتن متر بیشینه سرعت بر حسب دور بر دقیقه	آهنربای دائم ۳۰/(۹۴۰-۲۰۰۰) ۳۰.۵/(۰-۹۴۰) ۶۵۰۰
مولد برق ۱	نوع بیشینه قدرت بر حسب کیلووات بیشینه گشتاور بر حسب دور بر دقیقه / نیوتن متر بیشینه سرعت بر حسب دور بر دقیقه	آهنربای دائم ۱۵ ۵۵/(۰-۲۵۰۰) ۵۵۰۰
انباره	نوع فشار برق نامی بر حسب ولت ظرفیت بر حسب کیلووات ساعت / آمپر ساعت بیشینه توان در ۵۰٪ ذخیره انباره بر حسب کیلووات	ترکیب نیکل-فلز شامل ۴۰ پخش و هر بخش ۶ حجره ۱/۲ ۲۸۸ ۶.۵/۱.۸ ۲۱
نسبت	نسبت ما بین چرخ و محور عقب	۳/۹۲

References:

1. Farrall SD, Jones RP. Energy management in an automotive electric/heat engine hybrid powertrain using fuzzy logic, In: IEEE Proceedings of the 1993 international symposium on intelligent control, Chicago, Illinois; August 1993. p. 463–8.
2. Powell BK, Bailey KE, Cikanek SR. Dynamic modeling and control of hybrid electric-vehicle powertrain system. IEEE Contr Syst 1998;17–33.
3. Sepe RB, Miller JM, Gale AR. In: Intelligent efficiency mapping of a hybrid electric-vehicle starter/alternator using fuzzy logic, Digital avionics systems conference, vol. 2; October 1999. p. 8.B.2-1–8.
4. Brahma A, Glenn B, Guezennec Y, Miller T, Rizzoni G, Washington G. Modeling, performance analysis and control design of a hybrid sport-utility vehicle. In: Proceedings of the 1999 IEEE international conference on control applications Kohala Coast-Island of Hawai_i, USA, August 22–27; 1999. p. 448–53.
5. Kheir NA, Salman MA, Schouten NJ. “Emissions and fuel economy trade-off for hybrid vehicles using fuzzy logic”, Mathematics and Computers in Simulation, 2004.
6. Schouten NJ, Salman MA, Kheir NA. Fuzzy-logic control for parallel hybrid vehicles. IEEE Trans Contr Syst Technol 2002;10(3):460–8.
7. Hermance, D., “Toyota Hybrid System”, 1999 SAE TOPTEC Conference, Albany, NY, May 1999.
8. Jinming Liu, Huei Peng and Zoran Filipi, “Modeling and Analysis of the Toyota Hybrid System” IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, ۲۸-۲۳ July, ۲۰۰۵.
۹. عمادی، سیدابومحمد. “توسعه استراتژی پایشی جهت بهبود مدیریت قدرت در خودروهای هایبرید”، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، بهار ۱۳۸۷.
10. Xi Wei, “Modeling and Control of a Hybrid Electric Drivetrain for Optimum Fuel Economy, Performance and Driveability”, Ph.D. Thesis, Ohio State University, 2004.
11. Wang, W., “Revisions on the Model of Toyota Prius in ADVISOR 3.1”, SAE Paper 2002-01-0993.
12. Babuska, R. “Fuzzy and Neural Control Disc Course Lecture Notes”, Delft University of Technology, 2001
13. Muta, K., Yamazaki, M., and Tokieda, J. “Development of New-Generation Hybrid System THS II – Drastic Improvement of Power Performance and Fuel Economy”, SAE Paper 2004-01-0064.
14. Kim C., NamGoong E., Lee S., Fuel economy optimization for parallel hybrid vehicles with CVT, SAE Paper No. 1999-01-1148.

Performance Enhancement of Hybrid Eclectic Vehicles by Introduction of a Novel Power Split Device

B. Mashadi*

Assistant Professor
Department of Automotive Engineering
Iran University of Science and Technology
b_mashhadi@iust.ac.ir

S. A. M. Emadi

Powertrain Engineer
R & D Center
Iran Khodro Company
Sm.emadi@ikco.com

*Corresponding Author

Received: Apr. 04, 2009
Accepted in Revised Form: Feb. 07, 2010
Article No. 88100

Abstract

In this paper, an innovative power split device is introduced and a control strategy for a hybrid transmission using the device is developed. This transmission provides a mechanical connection between engine, two motors/generators and the rotational shaft which transmits drive force to the wheels. The controller receives battery state of charge (SOC), vehicle speed and power requested at wheels, and coordinates all components in such a way to optimize the entire system efficiency. A fuzzy logic controller is designed to sustain SOC in high regions and shift engine operating points to higher efficiency regions. A numerical optimization algorithm is used to control the engine speed in order to optimize the entire system, rather than optimizing only the engine. Matlab-Simulink and Advisor software are used for vehicle modeling, simulation and implementation of the controllers. Simulation results demonstrate remarkable improvements in fuel economy relative to simulation with default controller of Advisor.

Keywords: Power Split Device, Hybrid Power Train, Control Strategy, State of Charge, Fuzzy Logic